doi:10.13866/j.azr.2019.05.03

新疆及周边中亚地区大气可降水量分布的中亚低涡响应①

梁 倩[1]，光 莹[1]，刘 琼[1]，史文浩[1]，陈勇航[1,2]，杨莲梅[2]，李建刚[2]，王羽佳[1]

（1. 东华大学环境科学与工程学院，上海 201620；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：中亚低涡是新疆及中亚地区主要降水系统，为了揭示其影响下的大气降水潜力，利用2003—2014年夏半年中亚低涡发生时的AIRS Version 6 Level 2卫星资料，对夏半年中亚低涡降水系统月际变化和不同类型路径的大气可降水量分布规律进行了分析。结果表明：① 中亚低涡的南涡与北涡发生率明显不同。北涡占中亚低涡总发生率的68.31%，南涡占31.69%。其中，7、8月中亚低涡发生频次最高。② 按照中亚低涡不同路径分类来看，各路径发生率明显不同，其中，向东南方向移动的中亚低涡发生率最高。③ 从月际变化来看，5—9月平均大气可降水量整体分布趋势为中亚地区高于中国新疆地区。新疆吐鲁番盆地和塔里木盆地高于沿山脉分布的地区。④ 从路径类型来看，北涡各路径平均大气可降水量分布趋势整体相似，各路径均有26 mm以上大范围高值区，南涡各路径含量整体偏小，大都在18 mm以下。上述研究将为新疆和中亚地区突发性强降水天气预报预警以及人工增水提供参考。

关键词：中亚低涡；大气可降水量；移动路径；空间分布；新疆

大气可降水量是进行降水潜力和空中水资源评估的重要指标，对空中水资源的开发利用、提高降水量和灾害性天气预报预警准确性等工作具有重要意义[1-5]。关于大气可降水量，我国学者针对中东部地区已有大量观测及研究，但对干旱、半干旱的新疆和中亚地区[6]的相关研究较少[7-9]。早年由于地基站点观测数据的缺乏，张学文[2]利用100多个探空气象站资料做分析，得出经验公式，为没有探空资料地区的可降水量计算带来了方便；杨景梅等[10]根据1993年我国28个台站地面及高空气象要素资料，拟合出这28个台站所在地区整层大气可降水量同地面湿度参量（地面水汽压、地面露点）关系的经验表达式；施晓晖、杨莲梅、王佳津等[11-24]对包括新疆地区和西北地区乃至全球的水汽时空分布及水汽运输规律进行了研究，主要采用了地面观测资料和NCEP/NCAR再分析资料。以上研究采用的是来自地基站点观测数据，一定程度上受地基观测条件限制。

快速发展的卫星遥感技术，提供了覆盖空间广、算法一致的数据集。虽然也有一些学者，如王昀、刘岩、Minnis等[25-31]利用卫星资料研究降水过程，但大都采用较短时间的CloudSat卫星资料、CERES/Aqua卫星资料、MODIS/Aqua卫星资料和FY 2卫星资料来对云宏微观物理属性进行分析。本文应用目前国际上先进的超高光谱分辨率红外大气垂直探测仪AIRS获取的长时间段数据，针对新疆及周边中亚地区，特别是3大山系地区中亚低涡降水系统下大气可降水量分布规律进行研究，为提高新疆和中亚地区突发性强降水天气预报预警，从而为水利系统的防灾减灾、水资源优化配置和洪涝灾害的成因机理研究提供新的参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域

选取新疆及周边中亚地区为研究对象，地理坐标为35°~55°N，60°~97°E。中亚低涡是500 hPa高度

① **收稿日期**：2018-12-07； **修订日期**：2019-03-21
基金项目：2015年新疆高层次人才引进工程；科技部公益性行业科研专项（GYHY201506009）；科技部国家重点研发计划（2017YFA0603502）；基于多源卫星资料的新疆地区强降水数值模拟结果的诊断分析（Sqj2018001）；中国沙漠气象科学基金项目（sqj2012002）资助
作者简介：梁倩（1995-），女，硕士研究生，主要从事云水资源和数值模拟. E-mail:liangqian1995@126.com
通讯作者：陈勇航. E-mail:yonghang@126.com

场上低值中心位于60°~90°E,40°~60°N范围内出现2条以上等高线,并且维持时间在48 h以上的低压环流系统。在47.5°~55°N范围内活动的中亚低涡称为北涡,有2个明显的活动中心,分别位于萨彦岭一带和哈萨克丘陵地区。在35°~47.5°N范围内活动的中亚低涡称为南涡,塔什干地区和咸海东部地区是其2个明显的活动中心[32]。

1.2　数据与方法

美国发射的极地轨道卫星Aqua上搭载的AIRS是目前国际上先进的超高光谱分辨率红外大气垂直探测仪。大气红外探测仪有2 382个光谱通道,覆盖3.74~15.4 μm的光谱区间,扫描幅宽1 650 km,空间水平分辨率2.3 km(可见光/近红外通道)和13.5 km(红外通道)。AIRS卫星具有极高的光谱分辨率,这些精细的光谱通道能够探测到更加准确的更高垂直分辨率的大气各层温度和湿度信息[33]。

气象学中,大气可降水量(precipitable water vapor)指从地面直到大气上界的单位截面积大气柱中所含水汽总量全部凝结并降落到地面可以产生的降水量[34],单位是mm。是否能形成降水,还与温度、热力、动力不稳定条件等多种因素有关。降水量的多少是大尺度环流背景下的水汽输送、交换及降水转化能力共同作用的结果。

采用2003—2014年夏半年中亚低涡发生时的AIRS Version 6 Level 2卫星资料,对中亚低涡降水系统背景下夏半年及不同路径大气可降水量分布规律进行研究,在卫星资料处理过程中,首先对0.25°×0.25°网格点内的所有像素点上的数据求平均,然后再插值到每个格点上,结果分析将根据格点进行。

2　结果与分析

2.1　12 a内夏半年(5—9月)中亚低涡发生频率

考虑到中亚低涡基本发生于夏季,仅统计2003—2014年夏半年中亚低涡发生情况(表1)。研究表明,7、8月中亚低涡发生频次明显高于其他月份。北涡发生趋势与中亚低涡发生趋势基本一致,7、8月最高。南涡夏半年发生无明显规律,且频次较北涡发生频次低。

表1　12 a内夏半年(5—9月)中亚低涡发生天数和频数分布

Tab.1　Duration and frequency of Low Vortex over Central Asia from May to September in 12 years

	低涡天数/d	南涡发生频率/%	北涡发生频率/%	南涡天数/d	南涡各个月份占比/%	北涡天数/d	北涡各个月份占比/%
5月	15	80	20	12	26.67	3	3.09
6月	22	22.73	77.27	5	11.11	17	17.53
7月	52	34.62	65.38	18	40	34	35.05
8月	28	0	100	0	0	28	28.87
9月	25	40	60	10	22.22	15	15.46
总计	142	31.69	68.31	45	100	97	100

2.2　12 a内夏半年5—9月平均大气可降水量分布

2.2.1　北涡型　北涡型中亚低涡夏半年5—9月大气可降水量整体分布趋势为中亚地区高于中国新疆地区(图1)。新疆吐鲁番盆地和塔里木盆地高于新疆境内其他地区。山区普遍存在沿山脉分布的低值区。从月际变化来看,大致趋势为大气可降水量先增加后降低,在7、8月达到最大,9月最小。其中,5月高值主要分布在哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦境内。在新疆境内,大于20 mm的高值区主要分布在塔里木盆地东部的罗布泊附近,并向东延伸至河西走廊地区,最大值达29.56 mm;6、7、8月的分布趋势相似,仅7月较6、8月大气可降水量增加。高值广泛分布于新疆境外。仅在准噶尔盆地形成一个较明显的大气可降水量大于25 mm的高值区。6、7、8月新疆的最大值依次为46.04 mm、37.53 mm和46.55 mm,分别位于库尔勒东南的沙漠地区、昌吉市和且末附近。9月全区范围内的大气可降水量都很小,最大仅为28.60 mm,位于新疆且末附近。

2.2.2　南涡型　图2显示,南涡型中亚低涡夏半年(5—9月)大气可降水量整体分布趋势与北涡相同,为中亚地区高于中国新疆地区。新疆吐鲁番盆地和塔里木盆地高于新疆境内其他地区。山区普遍存在沿山脉分布的低值区。从月际变化来看,大致趋势为大气可降水量先增加后降低,在7月达到最大,5月最小。其中,5、9月在新疆境外无明显高值区,仅9月在新疆塔里木盆地有大于18 mm的高值区分布,最大值分别为33.73 mm和42.84 mm;6、7月的分布趋势相似,7月较6月含量高。高值分布趋势与北涡相

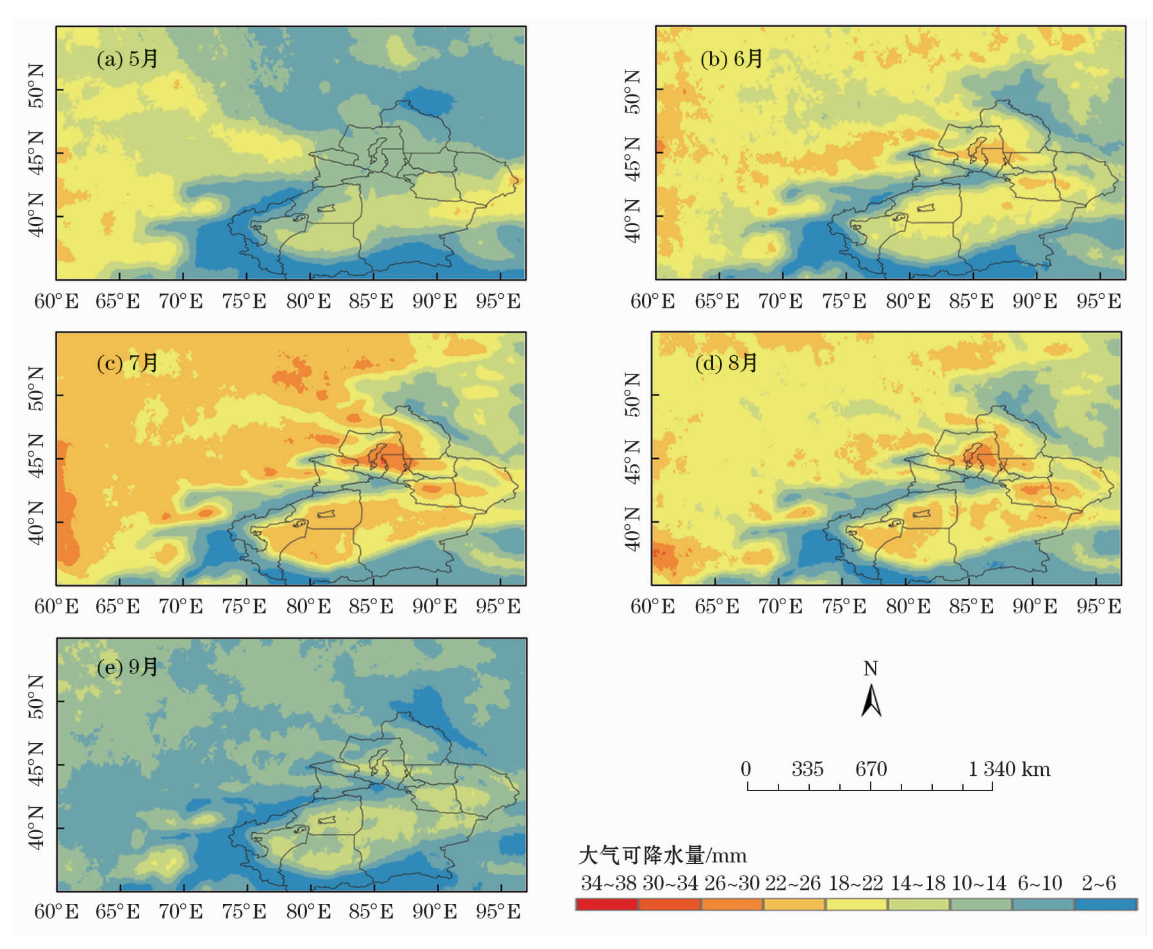


图1 新疆及周边中亚地区北涡型大气可降水量夏半年空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of precipitable water vapor of North Vortex over Xinjiang and surrounding Central Asia in summer

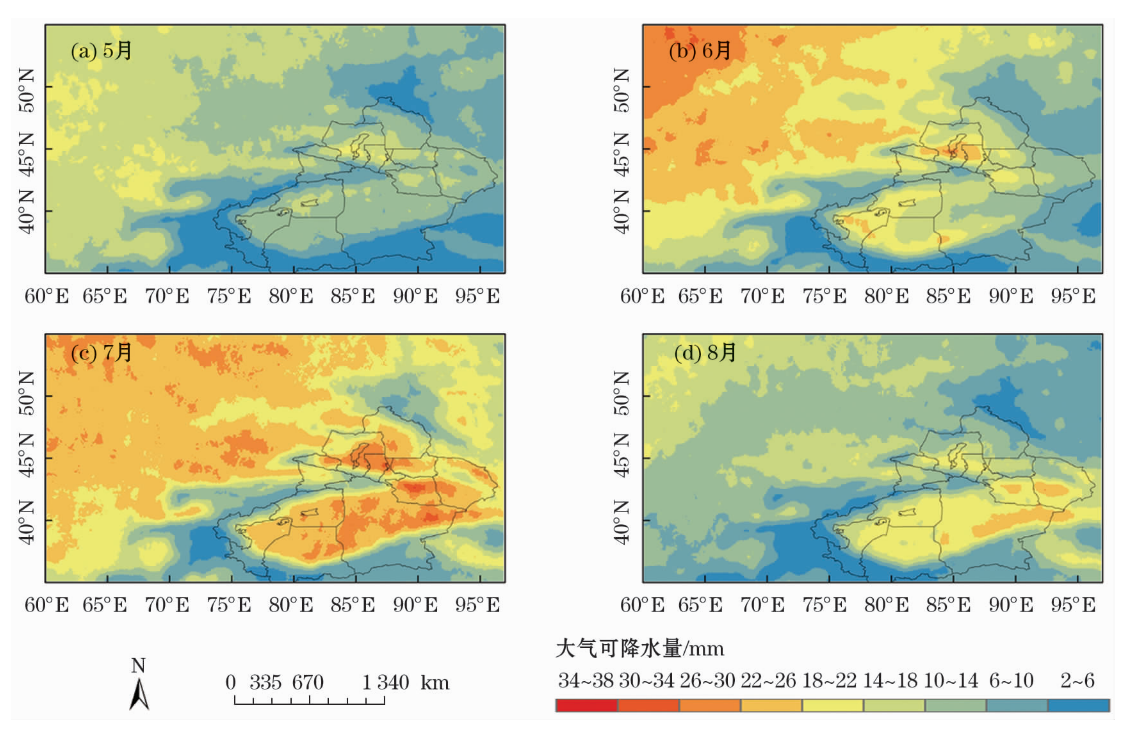


图2 新疆及周边中亚低涡南涡型大气可降水量夏半年空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitable water vapor of South Vortex over Xinjiang and surrounding Central Asia in summer

同。6、7月新疆最大值依次为34.89 mm和54.03 mm。

2.3　中亚低涡不同路径类型大气可降水量分布

为了研究中亚低涡移动路径对大气可降水量分布的影响,在中亚低涡形成后,将每天低涡中心位置连线,得到中亚低涡的移动路径。由于环流配置、中亚及新疆地区特殊的地理位置,不同移动路径造成的天气现象不同,云中液态水分布也有差异[35]。为表达简便,路径分类见表2。

表2　中亚低涡移动路径分类

Tab.2　Classification of moving paths of Central Asian Low Vortex

编号	1 偏北路径	2 偏西路径	3 原地少动或打转
A 向东北方向移动	1A 偏北路径向东北移动	2A 偏西路径向东北移动	
B 向东移动	1B 偏北路径向东移动	2B 偏西路径向东移动	
C 向东南方向移动	1C 偏北路径向东南移动	2C 偏西路径向东南移动	

注:3代表的原地少动或打转路径类型的中亚低涡,是一类特殊的移动路径,极风锋区或副热带风区上的低槽切涡于中亚地区,常表现为孤立活动,中心原地少动或打转后逐渐减弱。A表示移动路径与纬圈夹角在东北方向大于45°;B表示移动路径与纬圈基本平行;C表示移动路径在东南方向与纬圈夹角呈45°。例如:1A即为偏北路径向东北移动。下同。

2.3.1　北涡型　北涡各路径发生时,偏北路径发生频次最多(表3)。为了得到北涡大气可降水量随不同路径类型变化的空间分布特征,利用AIRS反演的大气可降水量的数据资料进行处理,得到研究区域12 a间北涡各路径平均大气可降水量空间分布图(图3)。总体来看,大气可降水量分布趋势基本相似,只是含量大小有所不同。

表3　12 a内北涡不同路径的中亚低涡天数统计

Tab.3　Statistic results of the days of different paths of Central Asia Low Vortex in 12 years

路径	1A	1B	1C	2A	2C	3
天数/d	8	31	38	4	2	14

偏北路径大气可降水量空间分布(图3a、3b、3c)随路径方向偏南,大气可降水量越小。沿天山和昆仑山脉有大范围的低值区。哈萨克斯坦、俄罗斯、乌兹别克斯坦及土库曼斯坦境内有大范围的高值区。新疆境内的高值区多分布于准噶尔盆地,以及吐鲁番—哈密盆地。准噶尔盆地大部分地区大气可降水量大于24 mm,吐鲁番—哈密盆地则基本上大于20 mm。天山南脉、昆仑山及阿尔金山区的大气可降水量均小于10 mm;偏西路径大气可降水量相似(图3d、3e)。其中,偏西向东北路径(2A)发生时,大气可降水量在哈萨克斯坦境内东南部靠近天山南脉的沙漠地区、西南地区和乌兹别克斯坦境内有大范围大于24 mm的高值区。研究区域平均值为18.23 mm,最大值为38.47 mm,位于新疆境内塔克拉玛干沙漠的塔中附近。新疆北部盆地是大气可降水量高值区,偏西向东南路径(2C)发生时,大于24 mm的高值区分布于哈萨克斯坦东南角。新疆北部大气可降水量增加。研究区域平均值为19.18 mm。新疆境内最大值高达48.17 mm,位于玛纳斯湖附近,原地少动或打转(3)的中亚低涡在2003—2014年共出现2次,分别在2005年和2012年,记为3Y05和3Y12。原地少动或打转(3)的大气可降水量空间分布(图3f、3g)无明显规律。整体仍为沿天山和昆仑山脉有大范围的低值区,仅在含量上有所不同。2005年个例中全区最大值高达51.07 mm,位于哈萨克斯坦东南的萨雷耶西克阿特劳沙漠,全区均值为21.00 mm,12 a北涡个例发生时,大气可降水量空间分布与2005年明显不同,研究区域西侧有大范围含量大于24 mm的大气可降水量。全区最大值为37.81 mm,位于乌兹别克斯坦境内。但其他地区的大气可降水量都不大,全区均值仅为14.98 mm,新疆仅在北部沿天山一带有较大范围的高值,奎屯市附近有最大值,为33.77 mm。

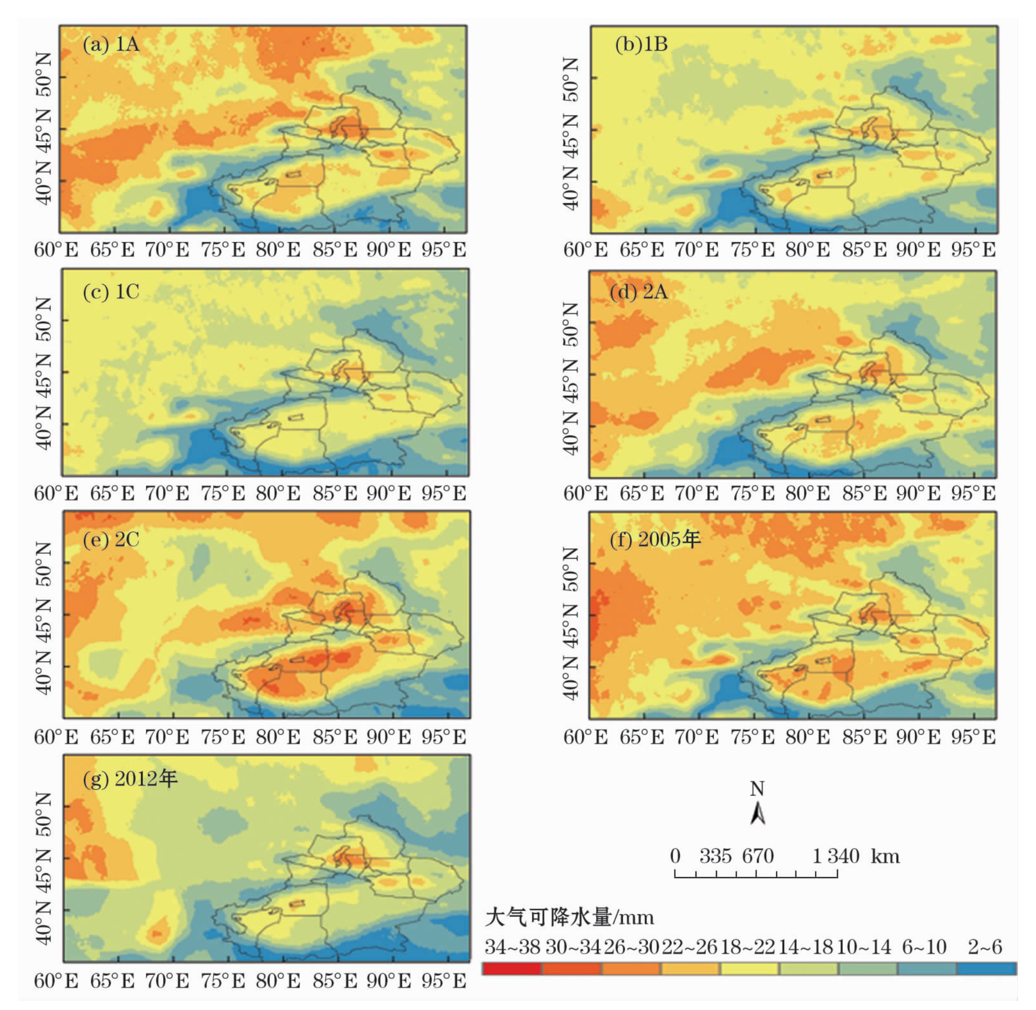
2.3.2　南涡型　南涡各路径发生时,偏西向东南路径(2C)、偏北向东南路径(1C)发生频次最多(表4)。总体来看,大气可降水量较北涡各路径整体偏小,且高值区基本都集中在新疆南部。

偏北向东北路径(1C)发生时(图4a),仅在研究区域西北部和新疆塔里木盆地及准噶尔盆地有大于26 mm的高值分布。大气可降水量全区平均值为16.62 mm。偏西向东北路径(2A)发生时(图4b),仅在新疆南部有高值区分布,全区均值为12.45 mm,偏西向东路径(2B)、偏西向东南路径(2C)发生时(图4c、4d),研究区域均无明显高值区分布。

表4　12 a内南涡不同路径的中亚低涡天数统计

Tab.4　Statistic results of the days of different paths of Central Asia Low Vortex in 12 years

路径	2A	2B	2C	1C
天数/d	3	2	55	28



注:1A 为偏北向东北路径;1B 为偏北向东路径;1C 为偏北向东南路径;2A 为偏西向东北路径;2B 为偏西向东路径;2C 为偏西向东南路径。下同。

图 3 12 a 内新疆及周边中亚地区北涡型各路径中亚低涡系统大气可降水量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of precipitable water vapor from different paths of North Vortex over Xinjiang and surrounding Central Asia in 12 years

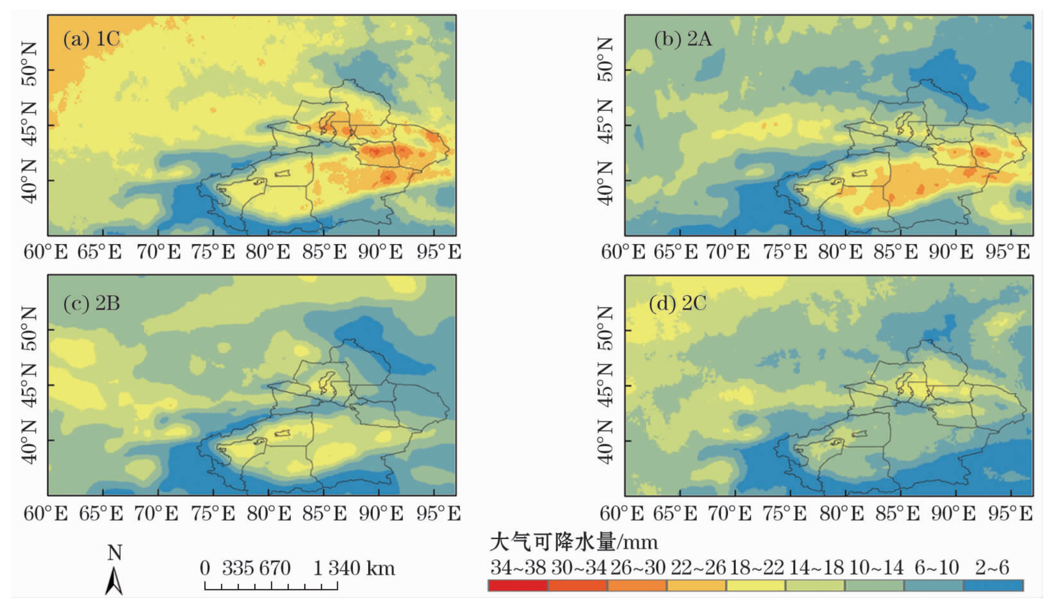


图 4 12 a 内新疆及周边中亚地区南涡型各路径中亚低涡系统大气可降水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitable water vapor from different paths of South Vortex of Central Asia Low Vortex System over Xinjiang and surrounding Central Asia in 12 years

3　结论与讨论

(1) 2003—2014 年夏半年,南涡与北涡发生频次明显不同,北涡发生频次为 97,占总中亚低涡发生率的 68.31%;南涡发生频次为 45,占总中亚低涡发生率的 31.69%。其中,7、8 月中亚低涡发生频次最高。

(2) 按照中亚低涡不同路径分类来看,2003—2014 年夏半年,北涡各路径发生时,偏北向东路径(1B)、偏北向东南路径(1C)发生频次最多,分别为 31 次和 38 次。南涡各路径发生时,偏西向东南路径(2C)、偏北向东南路径(1C)发生频次最多,分别为 55 次和 28 次。

(3) 从月际变化来看,北涡型 12 a 夏半年 5—9 月平均大气可降水量整体分布趋势为中亚地区高于中国新疆地区。新疆吐鲁番盆地和塔里木盆地高于新疆境内其他地区。山区普遍存在沿山脉分布的低值区,大致趋势为大气可降水量先增加后降低,在 7、8 月达到最大,9 月最小。南涡型与北涡型规律相似。

(4) 从路径类型来看,12 a 间北涡各路径平均大气可降水量分布趋势整体相似,仅含量大小有所不同。偏东北移动的中亚低涡整体大气可降水量均值较大,偏南和东南移动的中亚低涡整体大气可降水量均值较低。南涡型大气可降水量较北涡各路径整体偏小。且高值区基本都集中在新疆南部,平均值小于 18 mm。

张宁宁等[36]利用 GPS 观测资料,分析了 2016 年新疆大气可降水量的空间分布与海拔的关系,认为新疆地区大气可降水量 空间分布大致随海拔升高呈递减趋势,海拔每升高 1 km,大气可降水量减少约 1.4 mm。该结论与本文大气可降水量沿山区较少相印证。

降水往往是山区大于盆地,但大气可降水量与实际降水量存在差异。大气可降水量是气象参数,可表征大气中的水汽含量[37]和降水潜力。张娟等[38]利用 1971—2010 年柴达木盆地 8 个气象站及盆地外缘托勒气象站资料,计算了大气可降水量和降水转化率,认为可降水量变化趋势在空间上表现为自东南向西北增加的分布特征。这与可降水量多少的空间分布特征相反。这与本文新疆地区在准噶尔盆地、吐鲁番—哈密盆地和塔里木盆地附近的大气可降水量相对于研究区域明显高于其他地区相印证。山脉地形对水汽的形成与大气可降水量分布有很大的影响[39-43]。初步分析,盆地出现相对高值中心可能是由于西南气流的输送越过青藏高原进入盆地上空,盆地周围内陆流域分布的现代冰川消融量增加以及局地蒸发产生的水汽二者共同影响的结果。

张宁宁等[36]分析了 2016 年新疆大气可降水量的空间分布与季节的关系,认为大气可降水量季节性变化明显,夏季为 12.0～23.2 mm。本文夏季 6、7、8 月北涡型中亚低涡发生时,新疆地区大气可降水量在 18.0～30 mm;夏季 6、7 月南涡型中亚低涡发生时,新疆地区大气可降水量在 10.0～34 mm。由此可见,北涡型与南涡型大气可降水量在含量上存在差异,但在中亚低涡活动影响下的大气可降水量比没有中亚低涡活动时整体偏高。由于新疆地区中亚低涡的复杂性,今后会针对两者具体差异以及各路径大气可降水量的分布规律分析更多个例,并通过一些数值试验开展深入研究,总结一些对预报有指示意义的特征和指标,剖析大气可降水量未能转化为实际降水量的原因,以期对人工降水提供参考指标。

参考文献(References):

〔1〕 杨莲梅,关学锋,张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):249－259. 〔Yang Lianmei,Guan Xuefeng,Zhang Yingxin. Atmospheric circulation characteristics of precipitation anomaly in arid regions in Central Asia〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):249－259.〕

〔2〕 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系〔J〕. 气象,2004,30(2):9－11. 〔Zhang Xuewen. A relationship between precipitable-water and surface vapor pressure〔J〕. Meteorological Monthly,2004,30(2):9－11.〕

〔3〕 李国平. 地基 GPS 遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究〔D〕. 成都:西南交通大学,2007. 〔Li Guoping. Ground-Based GPS Remote Sensing Atmospheric Precipitable Water and Its Application in Meteorology〔D〕. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2007.〕

〔4〕 Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate〔J〕. Nature,1992,359(6 394):373－380.

〔5〕 李文宝,李畅游,贾德彬,等. 内蒙古中部夏季大气降水中同位素变化〔J〕. 干旱区研究,2017,34(6):1 214－1 221. 〔Li Wenbao,Li Changyou,Jia Debin,et al. Change of stable isotopes in summer precipitation in central Inner Mongolia〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(6):1 214－1 221.〕

〔6〕 杨莲梅,张云惠,秦贺. 中亚低涡研究若干进展及问题〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2015,9(5):1－8. 〔Yang Lianmei,Zhang Yunhui,Qin He. Some progresses and problems in central vortex research〔J〕. Desert and Oasis Meteorology,2015,9(5):1－8.〕

〔7〕 Starr V P,Peixoto J P. The hemispheric eddy flux of water vapor and its implications for the mechanics of the general circulation〔J〕. Archiv Für Meteorologie Geophysik Und Bioklimatologie Serie A,

1964,14(2):111－130.

〔8〕 Chen T C. Global water vapor flux and maintenance during FGGE〔J〕. Monthly Weather Review,1985,113(10):1 801－1 819.

〔9〕 Yu Yaxun,Wu Guoxiong,Wang Baoling,et al. Water vapor contentand mean transferin the atmosphereover Northwest China〔J〕. Chinese Journal of Meteorology,2001,15(2):191－204.

〔10〕 杨景梅,邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究〔J〕. 大气科学,2002,26(1):9－22.〔Yang Jingmei,Qiu Jinhuan. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters〔J〕. Chinese Journal of Atmosphere,2002,26(1):9－22.〕

〔11〕 杨莲梅,张云惠,汤浩. 2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析〔J〕. 高原气象,2012,31(4):963－973.〔Yang Lianmei,Zhang Yunhui,Tang Hao. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007〔J〕. Plateau Meteorology,2012,31(4):963－973.〕

〔12〕 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化〔J〕. 地理学报,2003,58(4):577－583.〔Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang〔J〕. Acta Geographica Sinica,2003,58(4):577－583.〕

〔13〕 施晓晖,徐祥德,程兴宏. 2008年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性"强信号"特征〔J〕. 气象学报,2009,67(3):478－487.〔Shi Xiaohui,Xu Xiangde,Cheng Xinghong. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2009,67(3):478－487.〕

〔14〕 胡列群,李帅,郑焙文. 新疆区域大气透明度影响因子分析〔J〕. 干旱区研究,2015,32(2):297－303.〔Hu Liequn,Li Shuai,Zheng Peiwen. Analysis of the impact factors of atmospheric transparency in Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,2015,32(2):297－303.〕

〔15〕 张云惠,杨莲梅,肖开提·多莱特,等. 1971—2010年中亚低涡活动特征〔J〕. 应用气象学报,2012,23(3):312－321.〔Zhang Yunhui,Yang Lianmei,Xiaokaiti Duolaite,et al. The Central Asian vortexes activity during 1971－2010〔J〕. Journal of Applied Meteorological Science,2012,23(3):312－321.〕

〔16〕 孔期,郑永光,陈春艳. 乌鲁木齐7·17暴雨的天气尺度与中尺度特征〔J〕. 应用气象学报,2011,22(1):12－22.〔Kong Qi,Zheng Yongguang,Chen Chunyan. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007〔J〕. Journal of Applied Meteorological Science,2011,22(1):12－22.〕

〔17〕 王江,周雅蔓,王昀,等. 2014年夏初南疆一次持续性强降雨过程的水汽和动力条件分析〔J〕. 干旱区地理,2015,38(6):1 103－1 111.〔Wang Jiang,Zhou Yaman,Wang Yun,et al. Water vapour and dynamic conditions of a continuity heavy rainfall over Southern Xinjiang in early summer 2014〔J〕. Arid Land Geography,2015,38(6):1 103－1 111.〕

〔18〕 赵光平,姜兵,王勇,等. 西北地区东部夏季水汽输送特征及其与降水的关系〔J〕. 干旱区地理,2017,40(2):239－247.〔Zhao Guangping,Jiang Bing,Wang Yong,et al. Characteristics of summer water vapor transport in the Eastern Northwest China and their relationships with precipitation〔J〕. Arid Land Geography,2017,40(2):239－247.〕

〔19〕 赵战成. 库尔勒一次强对流大暴雨天气特征分析〔J〕. 干旱区地理,2016,39(5):1 070－1 077.〔Zhao Zhancheng. Characteristics of a strong onvective weather and heavy rainstorm in Korla City,Xinjiang〔J〕. Journal of Arid Land Geography,2016,39(5):1 070－1 077.〕

〔20〕 韩军彩,周顺武,吴萍,等. 青藏高原上空夏季水汽含量的时空分布特征〔J〕. 干旱区研究,2012,29(3):457－463.〔Han Juncai,Zhou Shunwu,Wu Ping,et al. Spatial distribution of water vapor content over the Qinghai－Tibetan Plateau in summer〔J〕. Arid Zone Research,2012,29(3):457－463.〕

〔21〕 黄楚惠,顾清源,李国平,等. 一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析〔J〕. 高原气象,2010,29(4):832－839.〔Huang Chuhui,Gu Qingyuan,Li Guoping,et al. Mechanism analysis of Plateau vortex moving east trigger rainstorm in Sichuan Basin〔J〕. Plateau Meteorology,2010,29(4):832－839.〕

〔22〕 王婧羽,崔春光,王晓芳,等. 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征〔J〕. 气象,2014,40(2):133－145.〔Wang Jingyu,Cui Chunguang,Wang Xiaofang,et al. Analysis on water vapor transport and budget of the severe torrential rain over Beijing region on 21 July 2012〔J〕. Meteorological Monthly,2014,40(2):133－145.〕

〔23〕 廖晓农,倪允琪,何娜,等. 导致"7·21"特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究〔J〕. 气象学报,2013,71(6):997－1 011.〔Liao Xiaonong,Ni Yunqi,He Na,et al. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the "7·21" heavy rain case〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2013,71(6):997－1 011.〕

〔24〕 王佳津,王春学,陈朝平,等. 基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析〔J〕. 气象,2015,41(11):1 315－1 327.〔Wang Jiajin,Wang Chunxue,Chen Chaoping,et al. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan Basin based on HYSPLIT4 model〔J〕. Meteorological Monthly,2015,41(11):1 315－1 327.〕

〔25〕 王昀,王旭,赵笑颜,等. 新疆层云和层积云冰粒子属性的季节变化〔J〕. 干旱区地理,2017,40(3):589－597.〔Wang Yun,Wang Xu,Zhao Xiaoyan,et al. Seasonal variations of microphysical properties of ice particles for stratus and stratocumulus in Xinjiang〔J〕. Arid Land Geography,2017,40(3):589－597.〕

〔26〕 邓军英,丁明月,王文彩,等. 冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布〔J〕. 干旱区地理,2016,39(3):590－599.〔Deng Junying,Ding Mingyue,Wang Wencai,et al. Thevertical distribution of microphysical properties of ice cloud particles in a strong rainfall process〔J〕. Arid Land Geography,2016,39(3):590－599.〕

〔27〕 刘岩,马骁骏,李浩,等. 基于CloudSat和Aqua卫星资料的北疆一次暴雪过程中云的宏微观物理属性〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2015,9(2):9－15.〔Liu Yan,Ma Xiaojun,Li Hao,et al. Cloud macro and micro physical properties during a snowstorm based on cloudsat and aqua satellite data〔J〕. Desert and Oasis Meteorology,

2015,9(2):9－15.〕

〔28〕 苗爱梅,郝振荣,贾利冬,等. “0702”山西大暴雨过程的多尺度特征〔J〕. 高原气象,2014,33(3):786－800.〔Miao Aimei, Hao Zhenrong, Jia Lidong, et al. The multi-scale features of “0702” heavy rainstorm process〔J〕. Plateau Meteorology,2014,33(3):786－800.〕

〔29〕 李新华. 影响新疆南部地区环境变化的因素分析〔J〕. 干旱区研究,2012,29(3):534－540.〔Li Xinhua. Analyses on factors affecting ecological environment change in South Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,2012,29(3):534－540.〕

〔30〕 梁宏,刘晶淼,李世奎. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析〔J〕. 自然资源学报,2006,21(4):526－534,677.〔Liang Hong, Liu Jingmiao, Li Shikui. Analysis of precipitable water vapor source distribution and its seasonal variation characteristics over Tibetan Plateau and its surroundings〔J〕. Journal of Natural Resources,2006,21(4):526－534,677.〕

〔31〕 Wielicki B A, Barkstrom B R, Investigator I P. November Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document CERES Algorithm Overview〔M〕. Landley Research Center · Hampton, Virginia: NASA Reference Publication, 1997.

〔32〕 张云惠,杨莲梅,肖开提·多莱特,等. 1971—2010 年中亚低涡活动特征〔J〕. 应用气象学报,2012,23(3):312－321.〔Zhang Yunhui, Yang Lianmei, Xiaokaiti Duolaite, et al. The Central Asian vortexes activity during 1971－2010〔J〕. Journal of Applied Meteorological Science,2012,23(3):312－321.〕

〔33〕 Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems〔J〕. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2003,41(2):253－264.

〔34〕 杨红梅,葛润生. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量〔J〕. 气象,1998,24(9):8－11.〔Yang Hongmei, Ge Runsheng. Analysing troposphere air moisture content with single radiosonde station data〔J〕. Meteorological Monthly,1998,24(9):8－11.〕

〔35〕 张雪芹,李敏姣,孙通. 大气红外探测器(AIRS)资料揭示的中亚地区上对流层水汽时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2013,30(6):951－957.〔Zhang Xueqin, Li Minjiao, Sun Tong. Spatiotemporal variation of water vapor in upper troposphere over Central Asia based on AIRS satellite retrieval〔J〕. Arid Zone Research, 2013,30(6):951－957.〕

〔36〕 张宁宁,钟萍,杜文成,等. 基于地基 GPS 的新疆地区大气可降水量时空分布特征〔J〕. 大地测量与地球动力学,2019,39(1):41－44.〔Zhang Ningning, Zhong Ping, Du Wencheng, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of precipitable water vapor in Xinjiang based on ground-based GPS〔J〕. Geodesy and Geodynamics,2019,39(1):41－44.〕

〔37〕 周长艳,蒋兴文,李跃清,等. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征〔J〕. 高原气象,2009,28(1):55－63.〔Zhou Changyan, Jiang Xingwen, Li Yueqing, et al. Features of climate change of water vapor resource over eastern region of the Tibetan Plateau and its surroundings〔J〕. Plateau Meteorology, 2009, 28(1):55－63.〕

〔38〕 张娟,肖宏斌,徐维新,等. 1971—2010 年柴达木盆地可降水量变化特征及其与气象条件分析〔J〕. 资源科学,2013,35(11):2 289－2 297.〔Zhang Juan, Xiao Hongbin, Xu Weixin, et al. Precipitable water variation and its impact factorsin recent 40 years in Qaidam Basin〔J〕. Resources Science, 2013, 35(11): 2 289－2 297.〕

〔39〕 陈勇航,彭宽军,史玉光,等. 天山山区与塔克拉玛干沙漠云水资源的对比分析〔J〕. 干旱区地理,2009,32(6):886－891.〔Chen Yonghang, Peng Kuanjun, Shi Yuguang, et al. Comparison of cloud water resources over Tianshan Mountains and Takliman Desert〔J〕. Arid Land Geography,2009,32(6):886－891.〕

〔40〕 彭宽军,陈勇航,王文彩,等. 新疆山区低层云水资源时空分布特征〔J〕. 水科学进展,2010,21(5):653－659.〔Peng Kuanjun, Chen Yonghang, Wang Wencai, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of lower layer cloud water resources in Xinjiang mountain regions〔J〕. Advances in Water Science,2010,21(5):653－659.〕

〔41〕 陈勇航,邓军英,张萍,等. 中天山附近强降雨过程中云冰水含量随高度变化特征〔J〕. 资源科学,2013,35(3):655－664.〔Chen Yonghang, Deng Junying, Zhang Ping, et al. Vertical distribution of ice water content in clouds during heavy rains around Tianshan Mountain〔J〕. Resources Science,2013,35(3):655－664.〕

〔42〕 丁贤荣. 高山增水效应及其水资源意义〔J〕. 山地学报,2003,21(6):681－685.〔Ding Xianrong. Water increasing effect of mountains and its value of water resources〔J〕. Journal of Mountain Research,2003,21(6):681－685.〕

〔43〕 俞亚勋,王劲松,李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析〔J〕. 冰川冻土,2003,25(2):149－156.〔Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China〔J〕. Journal of Glaciologyand Geocryology,2003,25(2):149－156.〕

Distribution of Precipitable Water Vapor of Low Vortex over Xinjiang and Surrounding Central Asia in Summer

LIANG Qian[1], GUANG Ying[1], LIU Qiong[1], SHI Wen-hao[1], CHEN Yong-hang[1,2], YANG Lian-mei[2], LI Jian-gang[2], WANG Yu-jia[1]

(1. *College of Environmental Science and Engineering*, *Donghua University*, *Shanghai* 201620, *China*;
2. *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: The Central Asian Vortex is the main precipitation system over Xinjiang and Central Asia. Based on the data of AIRS Version 6 Level 2 from Aqua satellite in summer during the period of 2003 – 2014, the monthly variation of the Central Asian Vortex precipitation and the distribution of atmospheric precipitable water vapor from different paths were analyzed so as to reveal the atmospheric precipitation potential. The results showed that: ① Occurrence of the South Vortex and North Vortex over Central Asia was significantly different. The proportions of the North Vortex and the South Vortex accounted respectively for 68.51% and 31.69% of the total Central Asian Vortex. In July and August, the frequency of the vortex over Central Asia was the highest; ② According to the classification of different paths of the Central Asian Vortex, the occurrence of the paths was obviously different, in which the occurrence of Central Asia Vortex moving southeastward was the highest; ③ According to the monthly variation, the distribution trend of average atmospheric water vapor during the period from May to September was higher over Central Asia than that over Xinjiang, China, and it was higher over the Turpan and Tarim basins in Xinjiang than that over the areas distributed along the mountains; ④ According to the path type, the distribution trend of average atmospheric water vapor of the North Vortex was similar. Compared with the North Vortex, there were the large high-value (26 mm or more) areas along the paths, and the water vapor content along the paths of the South Vortex was low and mostly less than 18 mm. The study results could be referred in weather forecast and artificially enhancing precipitation in Xinjiang and Central Asia.

Key words: Central Asia Vortex; precipitable water vapor; moving path; spatial distribution; Xinjiang